

基于限流电抗器的统一潮流控制器故障渡越策略 及其与保护的配合

郑涛¹, 汤哲¹, 张滋行¹, 李厚源¹, 王赞鹏¹, 祁欢欢²

(1. 华北电力大学 新能源电力系统国家重点实验室, 北京 102206;

2. 全球能源互联网研究院有限公司 先进输电技术国家重点实验室, 北京 102200)

摘要:详细分析了基于模块化多电平换流器(MMC)的统一潮流控制器(UPFC)接入线路发生故障时的UPFC本体响应特性,提出一种基于限流电抗器的UPFC故障渡越策略。通过限制经过直流母线的故障电流,使得UPFC外部故障期间并联侧MMC不闭锁,从而实现故障渡越。在此基础上,研究并提出了UPFC故障渡越策略与线路距离保护的协调配合方案,可有效解决UPFC接入后对线路距离保护的不利影响。通过PSCAD/EMTDC进行了大量仿真试验,验证了所提策略和方案的有效性。

关键词:灵活交流输电;统一潮流控制器;故障渡越;限流电抗器;距离保护;继电保护

中图分类号:TM 77

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.201912017

0 引言

灵活交流输电技术FACTS(Flexible Alternating Current Transmission Systems)是一种利用大功率半导体器件完成能量变换、传输和控制的技术^[1]。统一潮流控制器UPFC(Unified Power Flow Controller)作为第三代FACTS装置,是控制电网状态的有效手段,只需要改变其控制规律,就能分别或同时实现并联补偿、串联补偿、移相、电压调节等功能^[2-5]。目前国内外主要应用的换流器拓扑结构有3种,即两电平换流器、三电平换流器和模块化多电平换流器MMC(Modular Multilevel Converter)^[6-12]。MMC具有模块化程度高、谐波含量少、故障处理能力强等优点,因而在工程中得到了越来越广泛的应用。

文献[8]分析了基于MMC的高压直流输电系统(MMC-HVDC)交流侧几种典型故障的故障特性,提出了能抑制不对称故障下的负序电流及有功功率波形波动的控制系统,该控制系统能限制一部分非严重性故障,其设计思路值得借鉴;文献[13]对MMC-UPFC本体内部的几种典型故障进行了故障特性分析,提出了交流侧保护配置及配合方案,但并未对UPFC接入线路故障进行仿真及分析;文献[14]亦只讨论了MMC-UPFC的不同接地方式对本体内部故障特性及保护配置的影响,并未涉及UPFC接入线

路故障。

本文首先对MMC-UPFC的组成结构及工作原理进行了阐述,分析了MMC-UPFC接入线路发生故障时的故障特性,在此基础上,给出MMC-UPFC故障渡越的定义,并提出基于限流电抗器CLR(Current Limiting Reactor)的MMC-UPFC故障渡越策略。最后,讨论了故障渡越策略可能对距离保护造成的不利影响,提出将高压侧旁路断路器HVB(High Voltage Breaker)合闸的解决方案。由于目前尚未有相关文献对UPFC接入线路故障期间的故障渡越策略及其与保护的相互配合进行研究,因此本文的研究工作具有重要意义。

1 MMC-UPFC接入线路故障时的故障特性分析

在PSCAD/EMTDC中搭建如图1所示的双回线路仿真模型,模型参数见表1。图中, U_{dc} 为直流母线极间电压;点 k_1 与M侧系统的距离为20%的线路长度;点 k_2 与M侧系统的距离为100%的线路长度,即点 k_2 为N侧母线;并联变压器接线方式为 $Y_0/\Delta/Y$;串联变压器接线方式为Ⅲ(开口Y)/ Δ/Y 。分别在点 k_1 和 k_2 处设置单相接地或相间短路故障,故障时刻为 $t=1.5$ s,持续时间为0.5 s。模型中,桥臂阀控过流保护的动作为2.6 kA;串、并联侧MMC桥臂达到阀控过流保护定值后,均经3 ms闭锁;串联侧MMC闭锁后,其晶闸管旁路开关TBS(Thyristor Bypass Switch)延时5 ms触发,HVB、低压侧旁路断路器LVB(Low Voltage Breaker)延时40 ms合闸;另外,参考实际工程^[5]中不考虑UPFC的静止同步串联补偿器(SSSC)运行模式,即并联侧MMC闭锁的同时串联侧MMC也会闭锁,本文在并联侧MMC闭锁后,会强制闭锁2个串联侧MMC,将UPFC退出。

收稿日期:2019-01-20;修回日期:2019-10-31

基金项目:国家重点研发计划智能电网技术与装备重点专项(2016YFB0900600);国家电网公司科技项目(52094017000W)
Project supported by the Key Project of Smart Grid Technology and Equipment of National Key Research and Development Plan of China(2016YFB0900600) and the Science and Technology Project of State Grid Corporation of China(52094017000W)

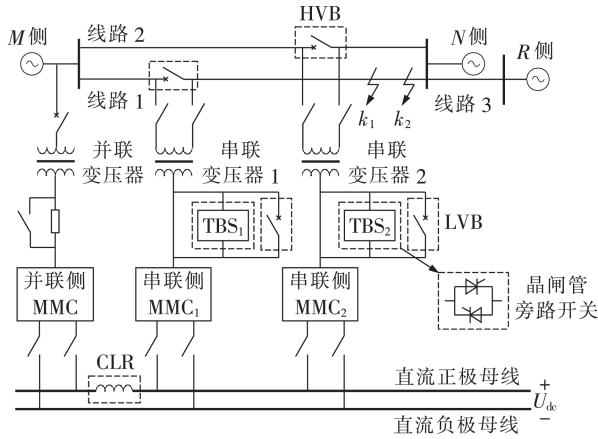


图1 仿真模型示意图

Fig.1 Schematic diagram of simulation model

表1 仿真模型参数

Table 1 Main parameters of simulation model

参数	参数值
系统电压/kV	500
直流电压/kV	180
串、并联MMC容量/(MV·A)	250
并联变漏抗/%	10
并联变压器变比	505 kV / 36 kV / 94 kV
串联变压器变比	43.5 kV / 36 kV / 105 kV

附录A中的图A1为点 k_1 在 $t=1.5$ s时发生A相金属性接地故障时的仿真波形图,其故障特性分析如下。

(1)如图A1(a)所示,故障后串联侧MMC₁先过流闭锁,闭锁后,在串联变压器1的TBS₁触发导通之前,其桥臂电流不为0,此时故障电流会通过串联侧MMC₁内部半桥子模块的反并联二极管馈入并联侧MMC,但过程中并联侧MMC的桥臂电流未达到阀控保护动作值。串联变压器1的TBS₁导通后,串联侧MMC₁的桥臂电流降为0,此过程中并联侧MMC桥臂电流、串联侧MMC₂的桥臂电流均未达到阀控保护动作值2.6 kA,此时故障电流主要经未闭锁的串联侧MMC₂馈入,造成并联侧MMC过流闭锁。由于本模型不考虑UPFC的SSSC的运行方式,故并联侧MMC闭锁的同时,串联侧MMC₂闭锁。

(2)如图A1(b)所示,由于N侧系统为中性点直接接地系统,故障发生后,M侧系统故障相交流母线电压降低,非故障相交流母线电压基本不变;并联侧MMC闭锁时刻,其无功出力逐渐降低至0,不再维持M侧交流母线电压;3个换流器闭锁时刻,系统的不平衡功率均会造成直流母线电压大幅度波动;2个串联侧MMC的TBS导通后,直流母线极间电压大幅度跌落。

2 基于CLR的UPFC故障渡越策略

2.1 MMC-UPFC故障渡越的概念

针对风电、光伏发电在低电压穿越方面的研究

已较为成熟,对其定义基本一致,即:在电力系统发生扰动甚至故障情况下,风电、光伏发电系统应能够保持不脱网运行,保持暂态稳定,并能顺利过渡到正常运行状态。而目前国内外相关文献对于UPFC的讨论多集中于其本体建模、控制、交流侧故障特性分析及保护配置上,尚未有相关文献对UPFC的故障渡越进行研究。

未采取故障渡越策略时,点 k_1 、 k_2 处发生A相金属性接地故障和AB相间短路故障时的UPFC故障特性见表2。表中, k_{1AG} 、 k_{1AB} 分别表示点 k_1 发生A相金属性接地短路和AB相间短路故障, k_{2AG} 、 k_{2AB} 分别表示点 k_2 发生A相金属性接地短路和AB相间短路故障;MMC₃表示并联侧MMC,后同。

表2 未采取故障渡越策略时不同短路故障的故障特性

Table 2 Fault characteristics of different short circuit faults without fault ride through strategy

故障类型	MMC闭锁情况	MMC闭锁原因
k_{1AG}	MMC ₁ —MMC ₃ 闭锁	$\begin{cases} \text{MMC}_1 \text{ 过流闭锁} \\ \text{MMC}_2 \text{ 电流增大} \end{cases} \rightarrow \text{MMC}_3$
k_{1AB}	MMC ₁ —MMC ₃ 闭锁	$\begin{cases} \text{MMC}_1 \text{ 过流闭锁} \\ \text{MMC}_2 \text{ 电流增大} \end{cases} \rightarrow \text{MMC}_3$
k_{2AG}	MMC ₁ —MMC ₃ 闭锁	$\begin{cases} \text{MMC}_1 \text{ 电流增大} \\ \text{MMC}_2 \text{ 电流增大} \end{cases} \rightarrow \text{MMC}_3$
k_{2AB}	MMC ₁ —MMC ₃ 闭锁	$\begin{cases} \text{MMC}_1 \text{ 过流闭锁} \\ \text{MMC}_2 \text{ 过流闭锁} \end{cases} \rightarrow \text{MMC}_3$

以 k_{1AG} 为例,说明串、并联侧MMC闭锁原因:串联侧MMC₁过流闭锁,故障电流经串联侧MMC₁、串联侧MMC₂馈入造成并联侧MMC过流闭锁(MMC₁过流闭锁、MMC₂电流增大 $\rightarrow$ MMC₃闭锁),并联侧MMC强制闭锁串联侧MMC₂(MMC₃ $\rightarrow$ MMC₂)。其他故障类型下串、并联侧MMC闭锁原因的分析与 k_{1AG} 类似,在此不再赘述。

根据第1节以及表2中的故障特性分析可知,MMC-UPFC接入线路发生单相接地故障或相间短路故障期间,可能会引起串、并联侧MMC闭锁,UPFC退出运行,因此,本文借鉴风电、光伏低电压穿越的理念,给出MMC-UPFC故障渡越的定义:在电网发生故障时,UPFC并联侧MMC不会闭锁,而是继续发出无功功率支撑并联侧交流母线电压,并能平稳过渡到正常运行状态。

2.2 基于CLR的UPFC故障渡越策略理论分析

MMC-UPFC接入线路故障时,造成并联侧MMC闭锁的原因是:MMC-UPFC接入线路故障期间,故障电流经过串联变压器网侧绕组耦合至阀侧,进而通过2个串联侧MMC馈入,流经直流母线,造成并联侧MMC因桥臂电流过流达到阀控保护动作值而闭锁。因此,并联侧MMC不再发挥作用,其无功出力

逐渐降为0,不能继续维持并联变压器接入点的交流母线电压,同时,直流母线极间电压也会大幅度跌落。因此,可以考虑在直流母线上投入限流装置,在UPFC接入线路故障期间,限制经过直流母线流向并联侧MMC的故障电流,确保并联侧MMC不闭锁。

以图1中点 k_1 发生A相金属性接地故障为例进行分析,故障发生时刻 $t=1.5$ s,故障持续0.5 s。在串联变压器1的TBS₁动作后,并联侧MMC过流闭锁,因此对此时的短路电流进行分析。

UPFC线路故障期间,MMC每相桥臂的投切子模块数量不断变化,因此MMC电路具有非线性时变特性,桥臂短路电流和直流母线电流的求解过程较为复杂。鉴于此,暂不考虑桥臂子模块投切状态的变化,而将MMC电路看作线性定常电路,利用叠加定理分析短路电流。TBS₁动作后,直流母线短路电流分为子模块电容放电电流 $i_{dc}(t)$ 和交流系统馈入电流 $i_{ac}(t)$,即总短路电流 $i(t)=i_{dc}(t)+i_{ac}(t)$ 。由于此时串联侧MMC₁的桥臂电流降为0,分析时可忽略不计。

参照文献[15]推导了子模块电容放电电流 $i_{dc}(t)$ 。图2为子模块电容放电等效电路。图中, C 为单个子模块中的电容器; L 为桥臂电抗器; R_T 为电抗器的直流电阻、电容器的串联电阻和放电回路金属构件的接触电阻之和; u_{Leq} 、 u_{Ceq} 分别为TBS₁触发后故障回路的等效电感电压和等效电容电压; $u_{Ceq}(0_-)$ 、 $u_{Ceq}(0_+)$ 分别为TBS₁触发前、后等效电容电压瞬时值, $u_{Ceq}(0_-)=u_{Ceq}(0_+)=U_0$, $i_{dc}(0_-)$ 、 $i_{dc}(0_+)$ 分别为TBS₁触发前、后电流瞬时值, $i_{dc}(0_-)=i_{dc}(0_+)=I_0$, U_0 、 I_0 分别为TBS₁触发瞬间直流母线电压、电流;每个MMC相单元的上、下桥臂在任意时刻共投入 n 个子模块,以维持直流母线电压恒定。

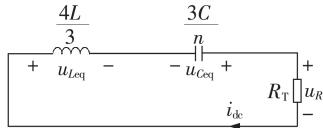


图2 子模块电容放电等效电路

Fig.2 Equivalent circuit of sub-module capacitors discharging

根据文献[15],求得子模块放电电流 $i_{dc}(t)$ 为:

$$i_{dc}(t) = e^{-\delta t} \sqrt{\frac{9U_0^2 C}{4nL} + I_0^2} \sin(\omega t + \gamma) \quad (1)$$

$$\begin{cases} \delta = \frac{3R_T}{8L} \\ \omega = \sqrt{\frac{n}{4LC} - \left(\frac{3R_T}{8L}\right)^2} \\ \gamma = \arctan\left(\frac{I_0}{U_0} \sqrt{\frac{4nL}{9C}}\right) \end{cases} \quad (2)$$

从式(2)可以看出,增大电感值可以减小电流振荡幅值 $\sqrt{9U_0^2 C/(4nL) + I_0^2}$,从而减小从串联侧MMC经直流母线流向并联侧MMC的故障电流。

此外,对于交流馈入电流 $i_{ac}(t)$,其故障回路较为复杂,难以给出详细的解析表达,但显然增大电感值亦可以减小交流系统馈入的短路电流分量,由于篇幅所限,不再详述。综上所述,增大桥臂电感值可以减小UPFC接入线路发生故障时,子模块电容放电电流和交流系统馈入电流,进而减小从串联侧MMC经直流母线流向并联侧MMC的故障电流。但改变桥臂电感会影响UPFC的正常运行状况,故本文提出在直流母线上串联CLR,减小故障电流,使并联MMC不闭锁,实现UPFC故障渡越。

CLR^[16]不仅能有效地抑制故障电流的上升速度,减小故障电流峰值,且对系统稳态的影响较小,造价也相对较低,因此在实际的柔性直流工程中得到了广泛应用。如图1所示,本文选择在直流母线上串联CLR,限制经直流母线流过并联侧MMC的故障电流,从而实现UPFC接入线路故障期间的故障渡越,即并联侧MMC不闭锁,直流母线电压基本维持在额定值,UPFC不完全退出运行。具体分析如下:

(1)如果故障期间2个串联侧MMC均闭锁,则此时UPFC转入静止同步补偿器STATCOM(STATic synchronous COMPensator)模式,继续输出无功功率,支撑接入点的交流母线电压;

(2)如果故障仅造成故障线路的串联侧MMC闭锁,则此时并联侧MMC与另一回线路上没有闭锁的串联侧MMC仍然可以实现UPFC的功能;

(3)如果故障期间2个串联侧MMC均不闭锁,则应将HVB合闸,UPFC转入STATCOM模式,避免UPFC的接入对距离保护的影响,同时并联侧MMC仍能输出无功功率,支撑接入点的交流母线电压。

采取本文的故障渡越策略后,不同短路故障的故障特性见表3。由表3可以看出,距M侧系统的线路远端或者近端发生故障时,投入CLR均能够可靠地实现故障渡越,保证并联侧MMC不闭锁。

表3 采取本文的故障渡越策略后,不同短路故障的故障特性

故障类型	MMC闭锁情况
k_{1AG}	MMC ₁ 闭锁,MMC ₂ 、MMC ₃ 不闭锁
k_{1AB}	MMC ₁ 、MMC ₂ 闭锁,MMC ₃ 不闭锁
k_{2AG}	MMC ₁ —MMC ₃ 不闭锁
k_{2AB}	MMC ₁ 、MMC ₂ 闭锁,MMC ₃ 不闭锁

2.3 CLR的取值

对于CLR的具体取值,本文通过大量的仿真验证,综合考量经济技术等各个指标,最终确定CLR

的较优取值。现对CLR分别为1、0.5、0.3 H及无CLR的情况进行比较分析。

2.3.1 CLR取值对故障特性的影响

CLR取值会影响故障期间的桥臂电流、直流电流以及桥臂闭锁情况。本文以典型故障,即在图1中的点 k_1 发生A相金属性接地故障为例进行分析,故障发生时刻 $t=1.5$ s,故障持续时间为0.5 s。附录B中的图B1给出了CLR分别为1、0.5、0.3 H以及无CLR时,发生故障后直流电流的仿真波形。由图可见,CLR分别为1、0.5、0.3 H以及无CLR的情况下,发生故障后直流电流的峰值分别为0、0.190 3、1.025 0、4.956 0 kA;CLR的取值越大,则故障期间2个串联侧MMC的桥臂电流峰值越小,流经直流母线的直流电流峰值越小,流向并联侧MMC的电流峰值越小,并联侧MMC更不易闭锁,从而实现故障渡越。

2.3.2 不同CLR取值对潮流调节速度的影响

电力网络潮流的调整控制是UPFC的主要功能之一,本文提出的在直流母线上串联CLR实现UPFC故障渡越的方法,会由于CLR的取值不同而影响暂态过程中UPFC潮流调节的速度。为衡量潮流调节的响应速度,本文将有功功率实际值曲线进入允许的误差范围,并不再超过该误差范围的最小时间,定义为潮流调整时间 ΔT 。附录B中的图B2给出了CLR分别为1、0.5、0.3 H以及无CLR情况下,串联侧MMC₁的有功功率参考值在 $t=2$ s从1 900 MW突然下降为1 800 MW时,串联侧MMC₁的有功功率测量值。图中, Δ 为误差范围,本文按照工程经验,取 $\Delta=5\%$ 。由图B2可看出,CLR分别为1、0.5、0.3 H以及无CLR情况下,潮流调整时间分别为0.058、0.053、0.051、0.049 s。这表明CLR取值的增加会降低暂态过程中潮流调节的响应速度。

从经济性角度出发,CLR的成本主要取决于电感值,故电感值的增加会导致实际工程造价的上升。

综上所述,在确保各种故障下并联侧MMC均不会闭锁的前提下,本文综合考虑经济技术等各项指标,择优选取0.5 H的CLR串联在直流母线中实现UPFC的故障渡越。

2.4 基于CLR的UPFC故障渡越策略仿真验证

本文选择的CLR电感值为0.5 H,其接入方式如图1所示,为了充分验证所提出的故障渡越策略的有效性,分别在图1所示系统中,距M侧系统的线路近端(点 k_1)和远端(点 k_2)设置故障,故障发生时刻 $t=1.5$ s,故障持续时间为0.5 s。

2.4.1 点 k_1 处发生故障

图3给出了点 k_1 发生A相金属性接地故障时的仿真波形。图中, Q_{MMC3} 为并联侧MMC吸收的无功功率; u_{pg} 为并联变压器网侧短引线电压。由图3可知,投入CLR后,只有串联侧MMC₁过流闭锁,并联侧

MMC与串联侧MMC₂均未闭锁,二者依然可以实现UPFC的功能。图4为点 k_1 发生AB相间短路故障时的仿真波形,投入CLR后,2个串联侧MMC均会过流闭锁,并联侧MMC不闭锁,UPFC转入STATCOM模式,继续发出无功功率维持M侧系统交流母线电压。由此可见,当距M侧系统的线路近端发生单相接地故障或者相间短路故障时,投入CLR可有效实现故障渡越,保证并联侧MMC不闭锁,UPFC不完全退出运行。

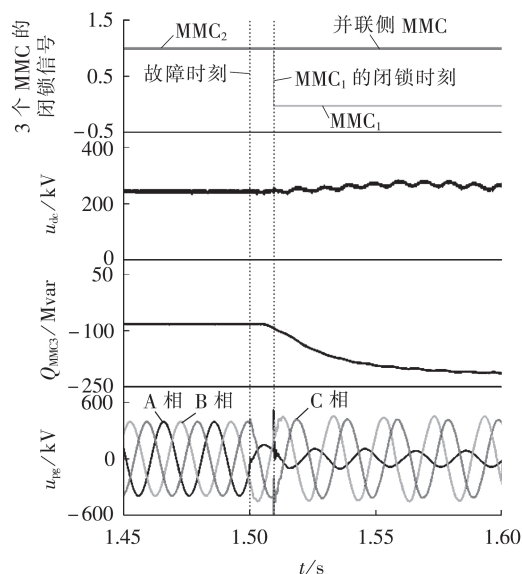


图3 点 k_1 发生A相金属性接地故障时的仿真波形
Fig.3 Simulative waveforms when phase-A metallic grounding fault occurs at point k_1

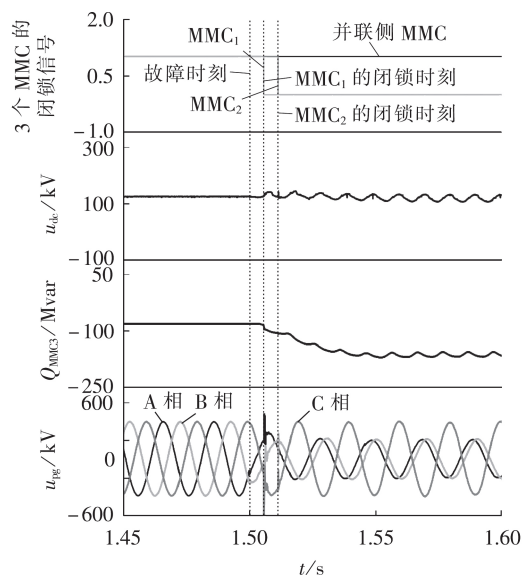


图4 点 k_1 发生AB相间短路故障时的仿真波形图
Fig.4 Simulative waveforms when inter-phase short circuit fault of phase-A and phase-B occurs at point k_1

2.4.2 点 k_2 处发生故障

为了进一步验证本文所提出的故障渡越策略的有效性,选择在距M侧交流母线的线路远端设置故

障,即点 k_2 处发生故障。

附录C中的图C1为点 k_2 处发生A相金属性接地故障时的仿真波形图。由图可见,故障时,CLR的投入使得3个MMC换流器均未闭锁,此时并联侧MMC继续发出无功功率支撑并联侧交流母线电压,直流母线极间电压基本维持在额定值附近。附录C中的图C2为点 k_2 处发生AB相间短路故障时的仿真波形图。由图可见,CLR投入后,2个串联侧MMC过流闭锁,并联侧MMC不闭锁,此时UPFC转入STATCOM模式,继续发出无功功率维持M侧系统交流母线电压。由此可见,当距M侧系统的线路远端发生单相接地或相间短路故障时,在直流母线上投入CLR可有效实现故障渡越,保证并联侧MMC不闭锁、UPFC不完全退出运行。

表4给出了点 k_1 、 k_2 发生金属性单相接地故障和相间短路故障后 $t=1.51$ s时的M侧系统A相交流母线电压。由表4可见,故障期间投入CLR后,并联侧MMC不闭锁,可以继续输出更多的无功功率,对并联侧交流母线电压起到更强的支撑作用。

表4 M侧交流母线A相电压

Table 4 Phase-A voltage of bus M

故障类型	电压/kV	
	无故障渡越	有故障渡越
k_{1AG}	100.1	102.7
k_{1AB}	168.2	171.3
k_{2AG}	187.4	223.7
k_{2AB}	234.5	236.8

3 基于CLR的故障渡越策略与距离保护的配合

UPFC接入线路后,由于受到串并联分支的影响,电网的电压、电流、阻抗等电气量发生变化,所以电网发生故障时,距离保护可能会误动作。以图1中的线路1发生A相非金属性接地故障为例,分析UPFC接入对距离保护的影响,所得结论同样适用于线路2。

保护1测得的测量阻抗如式(3)所示。

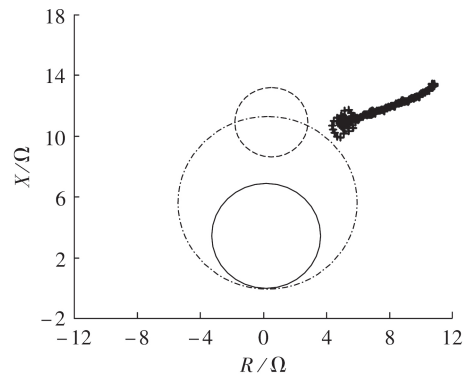
$$Z_J = Z_{1(1)} + \frac{\frac{Z_{1(1)} U_{se1}}{Z_{1(1)} I_{1.a} + (Z_{1(0)} - Z_{1(1)}) I_{1(0)}} + \frac{Z_{1(1)} I_{f.a} R_f}{Z_{1(1)} I_{1.a} + (Z_{1(0)} - Z_{1(1)}) I_{1(0)}}}{Z_{1(1)} I_{1.a} + (Z_{1(0)} - Z_{1(1)}) I_{1(0)}} \quad (3)$$

其中,方框中的部分为UPFC接入线路带来的阻抗增量;各参数定义及推导过程见附录D。

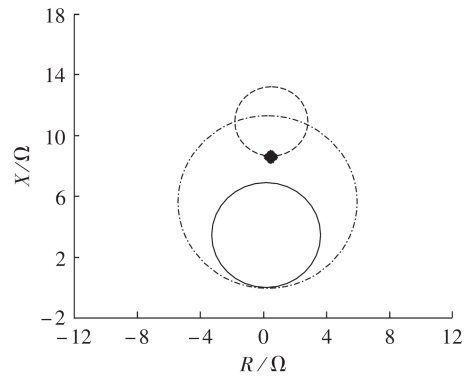
由式(3)可以看出,保护1处测量阻抗增量与串联侧注入电压有关。因此,当UPFC接入线路后,可能会影响距离保护的正确动作。

以线路1为例,分析故障渡越策略与线路距离保护的配合方案,所得结论同样适用于线路2。根据2.4节可知,图1中点 k_2 处发生A相金属性接地故

障,CLR投入后,3个MMC均不会闭锁。但此时由于故障还未清除,如图5(a)所示,线路1的UPFC串联侧注入电压会产生附加阻抗,引起保护1测量阻抗的变化,UPFC的接入会造成保护1的距离保护II段拒动。为了消除UPFC的接入对距离保护的影响,将2个HVB合闸,UPFC的串联侧退出运行,UPFC转成STATCOM模式。此时测量阻抗可以准确落在保护1的距离保护II段整定圆内,由此可见,将2个HVB合闸,可以有效地避免UPFC的接入对线路距离保护的影响,如图5(b)所示。



(a) HVB合闸前



(b) HVB合闸后

— 保护1的I段整定阻抗圆
--- 保护1的II段整定阻抗圆
--- 保护3的I段整定阻抗圆
+ 测量阻抗

图5 2个HVB合闸前、后测量阻抗与整定阻抗圆的关系

Fig.5 Relationship between measured impedance and setting impedance circle after and before two HVBs are closed

4 结论

本文针对MMC-UPFC接入线路发生故障时,串/并联侧MMC由于过电流闭锁,致使UPFC退出运行的情况,提出一种适用于MMC-UPFC的故障渡越策略及其与保护配合的方法,所得结论如下。

(1)通过在直流母线上串联接入CLR,可以限制外部故障期间由串联MMC经直流母线流向并联侧MMC的电流,有效避免并联侧MMC过流闭锁,实现

MMC-UPFC的故障渡越。

(2)CLR投入时,由于故障后串联MMC不闭锁,故障所在线路距离保护会发生拒动或误动,鉴于此,本文给出一种外部故障期间将HVB合闸的方案,有效避免了UPFC接入对距离保护的影响。此时UPFC转入STATCOM模式,支撑接入点的交流母线电压。

综上所述,本文所提MMC-UPFC故障渡越策略及其与保护的协调配合方案简单易行,效果显著,可为UPFC实际工程提供重要参考。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 徐政. 柔性直流输电系统[M]. 北京:机械工业出版社,2016:1-2.
- [2] 马朋,刘青,邹家平,等. UPFC有功控制引起的交互影响研究[J]. 电力自动化设备,2017,37(1):176-181,223.
MA Peng, LIU Qing, ZOU Jiaping, et al. Research on interaction during active power-flow control of UPFC[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(1): 176-181, 223.
- [3] 庄良文,张彦兵,荆雪记,等. 基于RTDS仿真的MMC-UPFC串联间接电流控制研究[J]. 电力系统保护与控制,2016,44(16):56-62.
ZHUANG Liangwen, ZHANG Yanbing, JING Xueji, et al. Simulation research of MMC-UPFC indirect current control strategy based on RTDS[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(16): 56-62.
- [4] 崔福博,郭剑波,荆平,等. MMC-UPFC接地设计及其站内故障特性分析[J]. 中国电机工程学报,2015,35(7):1-9.
CUI Fubo, GUO Jianbo, JING Ping, et al. The grounding design and internal fault characteristic of MMC-UPFC[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(7): 1-9.
- [5] 李晓明,曹冬明,田杰,等. 统一潮流控制器用串联变压器设计[J]. 江苏电机工程,2016,35(1):41-44.
LI Xiaoming, CAO Dongming, TIAN Jie, et al. The design of series transformer applied in the unified power-flow controller[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2016, 35(1): 41-44.
- [6] 李辉,邓吉利,姚然,等. 计及运行工况的MMC换流阀可靠性建模与分析[J]. 电力自动化设备,2018,38(10):108-114.
LI Hui, DENG Jili, YAO Ran, et al. Reliability modeling and analysis of MMC converter valve considering operation conditions[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(10): 108-114.
- [7] 刘钟淇,宋强,刘文华. 采用MMC变流器的VSC-HVDC故障态研究[J]. 电力电子技术,2010,44(9):69-71.
LIU Zhongqi, SONG Qiang, LIU Wenhua. Research on the VSC-HVDC system using modular multilevel converters under fault condition[J]. Power Electronics, 2010, 44(9): 69-71.
- [8] CHEN Xiaofang, ZHAO Chengyong, CAO Chengang. Research on the fault characteristics of HVDC based on modular multilevel converter[C]//2011 IEEE Electrical Power and Energy Conference. Winnipeg, MB, Canada: IEEE, 2011: 91-96.
- [9] SCHMITT D, WANG Y, WEYH T, et al. DC-side fault current management in extended multiterminal-HVDC-grids[C]//9th International Multi-Conference on System, Signals and Devices. Chemnitz, Germany: IEEE, 2012: 1-5.
- [10] 张建坡,赵成勇,黄晓明,等. 基于模块化多电平直流输电系统接地故障特性仿真分析[J]. 电网技术,2014,38(10):2658-2664.
ZHANG Jianpo, ZHAO Chengyong, HUANG Xiaoming, et al. Simulation research on earth fault characteristics of modular multilevel converter based high voltage direct current transmission system[J]. Power System Technology, 2014, 38(10): 2658-2664.
- [11] 薛英林,徐政. 稳态运行和直流故障下桥臂交替导通多电平换流器的控制策略[J]. 高电压技术,2012,38(6):1521-1528.
XUE Yinglin, XU Zheng. Control strategy of AAMC under steady operation and DC fault condition[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(6): 1521-1528.
- [12] 赵成勇,刘涛,郭春义,等. 基于实时数字仿真器的模块化多电平换流器的建模[J]. 电网技术,2011,35(11):85-90.
ZHAO Chengyong, LIU Tao, GUO Chunyi, et al. Modeling of modular multilevel converter based on real-time digital simulator[J]. Power System Technology, 2011, 35(11): 85-90.
- [13] 郑涛,吴丹,宋洁莹. 基于MMC的统一潮流控制器交流侧故障特性及保护方案[J]. 电网技术,2015,39(12):3570-3577.
ZHENG Tao, WU Dan, SONG Jieying. The AC side fault characteristics and protection scheme of the unified power flow controller based on MMC[J]. Power System Technology, 2015, 39(12): 3570-3577.
- [14] 郑涛,吴丹,陆振纲,等. MMC-UPFC不同接地设计的故障特性及对本体保护配置影响[J]. 电力自动化设备,2017,37(5):54-60.
ZHENG Tao, WU Dan, LU Zhengang, et al. Impact of MMC-UPFC grounding design on fault characteristic and protection scheme[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(5): 54-60.
- [15] 王江天,王兴国,马静,等. 双极MMC-HVDC系统故障限流及换流器快速重启策略研究[J]. 中国电机工程学报,2017,37(增刊):21-29.
WANG Jiangtian, WANG Xingguo, MA Jing, et al. Research on fault current limiting and fast restart strategy for the bipolar MMC-HVDC system[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(Supplement): 21-29.
- [16] 孙棚,王华伟,雷霄,等. 架空柔性直流电网的直流短路电流限制研究[J]. 电力自动化设备,2017,37(2):219-223.
SUN Xu, WANG Huawei, LEI Xiao, et al. Restriction of DC short circuit current for overhead lines of flexible DC grid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(2): 219-223.

作者简介:



郑涛

郑涛(1975—),男,山东济南人,教授,博士,主要研究方向为新能源电力系统保护与控制(E-mail: zhengtao_sf@126.com);

汤哲(1995—),女,山东日照人,硕士研究生,主要研究方向为新能源电力系统保护与控制(E-mail: 823338011@qq.com);

张滋行(1991—),女,河北承德人,硕士研究生,主要研究方向为新能源电力系统保护与控制(E-mail: 18722209639@163.com);

李厚源(1990—),男,山东淄博人,博士研究生,主要研究方向为新能源电力系统保护与控制(E-mail: lih@ncepu.edu.cn);

祁欢欢(1986—),女,山东烟台人,工程师,硕士,主要研究方向为电力系统继电保护、柔性输变电装置继电保护、新型储能技术等(E-mail: qihuanhuan6666@163.com)。

(编辑 任思思)

(下转第20页 continued on page 20)

Variable-frequency optimization strategy based on backflow power of MMC-H DC transformer in DC distribution network

MEI Jun¹, GUAN Zhou¹, DING Ran¹, FAN Guangyao¹, GE Rui¹, WANG Bingbing¹, LIANG Dong², ZONG Jin²

(1. School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China;

2. State Grid Jibei Electric Power Co., Ltd., Beijing 100054, China)

Abstract: The MMC-H (Modular Multilevel Converter-H-bridge) DC (Direct Current) transformer suitable for DC distribution system is studied, which is composed of MMC arm, H-bridge and AC transformer. MMC utilizes staircase modulation and H-bridge adopts square-wave modulation. Besides, the formula of transmission power and backflow power based on phase-shift control are derived, and the factors that affect the backflow power and the boundary conditions of zero backflow power are summarized. In order to suppress the backflow power, a variable-frequency optimization strategy is proposed. The phase-shift ratio can be adjusted to fall into the zero backflow power zone through variable operating-frequency strategy, so as to reduce the backflow power and current stress. Finally, an experimental prototype is built to verify the feasibility of variable-frequency optimization strategy. The experimental results show that the variable-frequency optimization strategy can adjust the phase-shift ratio, reduce the current stress and loss, and improve the efficiency of DC transformer.

Key words: modular multilevel converter; DC transformer; power formula; zero backflow power zone; variable-frequency optimization

(上接第13页 continued from page 13)

Fault ride through strategy of unified power flow controller based on current limiting reactor and its coordination with protection

ZHENG Tao¹, TANG Zhe¹, ZHANG Zihang¹, LI Houyuan¹, WANG Yunpeng¹, QI Huanhuan²

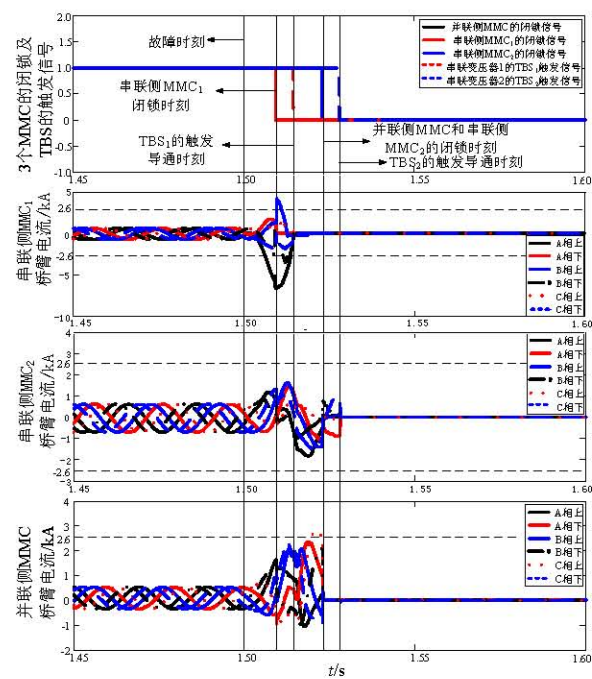
(1. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;

2. State Key Laboratory of Advanced Power Transmission Technology, Global Energy Interconnection Research Institute Co., Ltd., Beijing 102200, China)

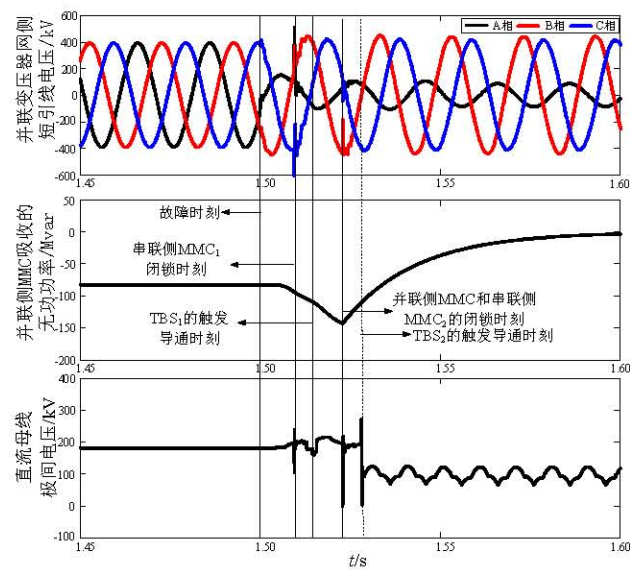
Abstract: The response characteristics of UPFC (Unified Power Flow Controller) based on MMC (Modular Multilevel Converter) in case of failure of UPFC access line are analyzed in detail, and an FRT (Fault Ride Through) strategy based on CLR (Current Limiting Reactor) is proposed, which can make MMC at the shunt side being unblocked during external fault of UPFC by limiting the fault current passing through the DC link bus. On this basis, a coordination scheme of the FRT strategy of UPFC with the line distance protection is provided, which can effectively eliminate the adverse effects on the line distance protection. Simulation experiments are carried out in PSCAD/EMTDC, and the results verify the effectiveness of the proposed FRT strategy and coordination scheme.

Key words: FACTS; unified power flow controller; fault ride through; current limiting reactor; distance protection; relay protection

附录 A



(a) 闭锁、TBS 的导通信号及 3 个 MMC 换流器的桥臂电流波形图



(b) M 侧交流母线电压、并联侧 MMC 无功出力及直流母线极间电压波形图

图 A1 点 k_1 发生 A 相金属性接地故障时的仿真波形

Fig.A1 Simulative waveforms when phase-A metallic grounding fault occurs at k_1

附录 B

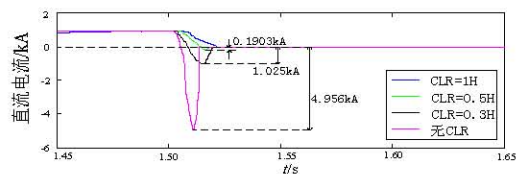
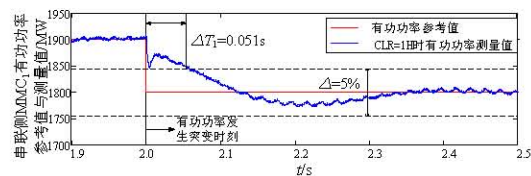
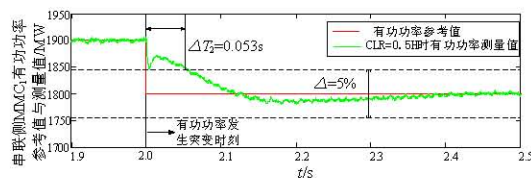


图 B1 点 k_1 发生 A 相金属性接地故障时，不同 CLR 取值下的直流电流

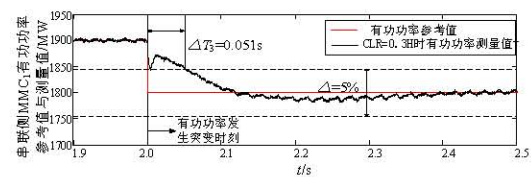
Fig.B1 DC current when phase-A metallic grounding fault occurs at k_1 , with different CLR values



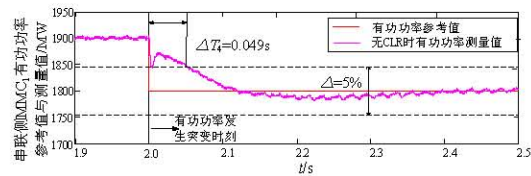
(a) CLR 取值为 1H 时，串联侧 MMC₁ 有功功率参考值及测量值



(b) CLR=0.5H 时，串联侧 MMC₁ 有功功率参考值及测量值



(c) CLR=0.3H 时，串联侧 MMC₁ 有功功率参考值及测量值



(d) 无 CLR 时，串联侧 MMC₁ 有功功率参考值及测量值

图 B2 串联侧 MMC₁ 的有功功率参考值改变时，MMC₁ 的有功功率测量值

Fig.B2 Active power measurement of MMC₁ when the active power reference value of the series side MMC₁ is changed

附录 C

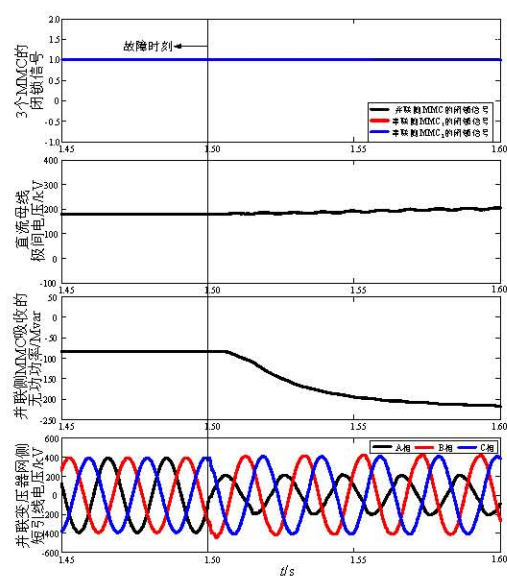


图 C1 点 k_2 发生 A 相金属性接地故障时的仿真波形

Fig.C1 Simulative waveforms when phase-A metallic grounding fault occurs at k_2

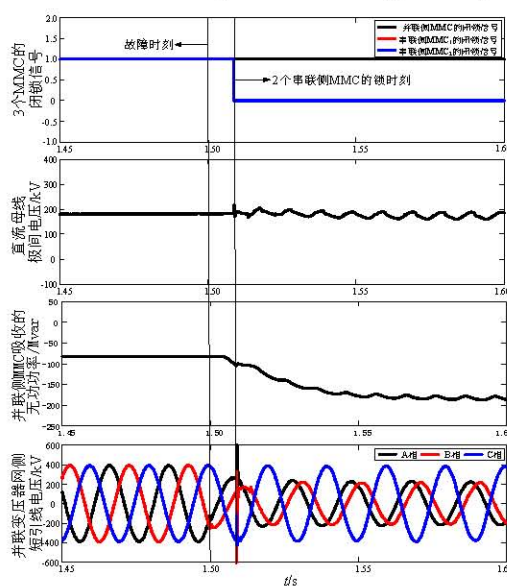


图 C2 点 k_2 发生 AB 相间短路故障时的仿真波形

Fig.C2 Simulative waveforms when phase-A-to-B short-circuit fault occurs at k_2

附录 D

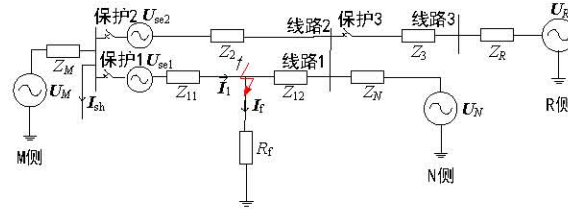
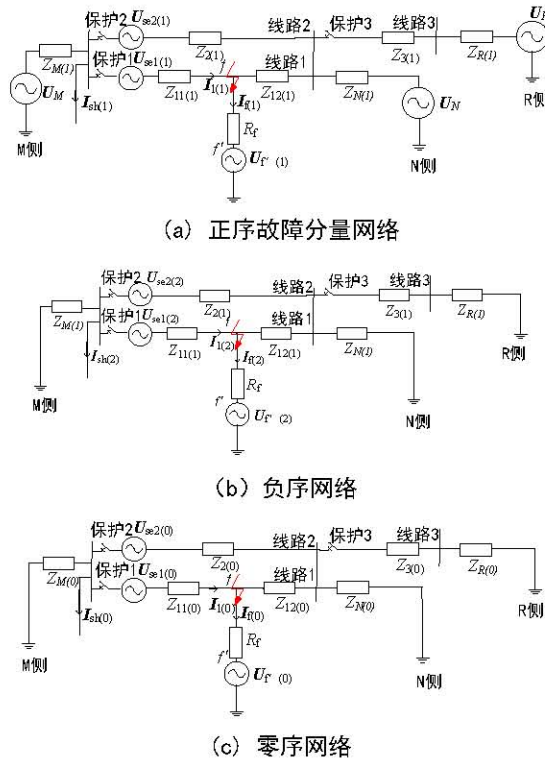


图 D1 UPFC 接入线路时发生单相非金属性接地故障的等效电路

Fig.D1 Equivalent circuit of single-phase non-metallic ground fault when UPFC is connected to the line

图中, U_M 、 U_N 、 U_R 分别为 M 、 N 、 R 侧的电源; U_{se1} 、 U_{se2} 分别为线路 1、2 接入的 UPFC 串联侧注入电网的电压; Z_M 、 Z_N 、 Z_R 分别为 M 、 N 、 R 侧电源的内阻; Z_{11} 、 Z_{12} 分别为线路 1 故障点 f 前、后的线路阻抗值; Z_2 、 Z_3 分别为线路 2、3 的阻抗值; R_f 为短路时的过渡电阻; I_1 、 I_f 分别为流经阻抗 Z_{11} 、过渡电阻 R_f 的电流; I_{sh} 为 UPFC 并联侧注入电流; 保护 1、2、3 分别为线路 1、2、3 上安装的保护。假设 Z_{11} 、 Z_{12} 、 Z_2 、 Z_3 阻抗角相同, 并且不考虑双回线路的互阻抗。

当线路 1 的点 f 发生 A 相非金属性接地故障时, 各序网络如图 D2 所示。



图D2 UPFC 接入线路时发生单相非金属性接地故障各序网络图

Fig.D2 Sequence network diagram of single-phase non-metallic ground fault when UPFC is connected to the line

图 D2 中, (0)、(1)、(2) 分别表示零、正、负序分量, $U_{f'}$ 为点 f' 的对地电压。

设保护 1 测得的电压、电流分别为 U_1 、 I_1 , 则保护 1 测得的电压正序分量为:

$$U_{1(1)} = U_{se1(1)} + Z_{11(1)} I_{1(1)} + I_{f(1)} R_f + U_{f'(1)} \quad (D1)$$

保护 1 测得的电压负序分量为：

$$U_{1(2)} = U_{se1(2)} + Z_{11(1)} I_{1(2)} + I_{f(2)} R_f + U_{f'(2)} \quad (D2)$$

保护 1 测得的电压零序分量为：

$$U_{1(0)} = U_{se1(0)} + Z_{11(0)} I_{1(0)} + I_{f(0)} R_f + U_{f'(0)} \quad (D3)$$

所以保护 1 测得的 A 相电压为：

$$U_{1.a} = U_{1(1)} + U_{1(2)} + U_{1(0)} = U_{se1} + Z_{11(1)} I_{1.a} + (Z_{11(0)} - Z_{11(1)}) I_{1(0)} + I_{f.a} R_f \quad (D4)$$

保护 1 处的测量阻抗为：

$$Z_J = \frac{U_{1.a}}{I_{1.a} + 3K_0 I_{1(0)}} = \frac{U_{1.a}}{I_{1.a} + 3 \times \frac{Z_{11(0)} - Z_{11(1)}}{3Z_{11(1)}} I_{1(0)}} \quad (D5)$$

其中， $U_{1.a}$ 、 $I_{1.a}$ 、 $I_{1(0)}$ 分别为保护 1 处测得的故障时 A 相电压、A 相电流、零序电

流； $K_0 = \frac{Z_{11(0)} - Z_{11(1)}}{3Z_{11(1)}}$ 为零序电流补偿系数； $Z_{11(0)}$ 、 $Z_{11(1)}$ 分别为线路的零序阻抗和正序阻抗。

将式 (D4) 带入式 (D5) 得到：

$$Z_J = Z_{11(1)} + \Delta Z \quad (D6)$$

其中，阻抗增量为：

$$\Delta Z = \frac{Z_{11(1)} U_{se1}}{Z_{11(1)} I_{1.a} + (Z_{11(0)} - Z_{11(1)}) I_{1(0)}} + \frac{Z_{11(1)} I_{f.a} R_f}{Z_{11(1)} I_{1.a} + (Z_{11(0)} - Z_{11(1)}) I_{1(0)}} \quad (D7)$$